
Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras

Valeria Díaz Suárez, Carlos Páez Pérez

Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito - CORPAIRE
Av. Amazonas 2925 e Inglaterra, Quito - Ecuador

e-mail: vdiaz@corpaire.org

Resumen

De acuerdo con los datos de monitoreo de la calidad del aire en Quito, los dos últimos años, el material particulado constituye uno de los contaminantes que con más recurrencia presenta excedencias del límite máximo permitido fijado en la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire. Se presenta una descripción de la capacidad de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito para monitorear el material particulado, así como los criterios para la conformación del sistema, constituido por una combinación de diferentes metodologías, desde los analizadores automáticos de $PM_{2.5}$ por atenuación de rayos beta, los muestreadores de alto volumen para PTS y PM_{10} , hasta los muestreadores de polvo sedimentable de fabricación casera. Adicionalmente, se ha realizado la caracterización química de las muestras de PM_{10} , con la finalidad de determinar los contenidos de carbón total, polvo mineral e iones, lo cual permite tener una aproximación sobre los orígenes (fuentes de emisión) de este contaminante y, a partir de allí, datos más objetivos para definir la estrategia más adecuada de control. Aparte de las complejidades técnicas y científicas de este proceso, es importante resaltar el significativo esfuerzo desplegado para identificar las capacidades existentes en distintas instituciones y lograr su participación en esta tarea.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, material particulado, carbón total, polvo mineral, iones, PM_{10} , $PM_{2.5}$, red de depósito, Quito, Ecuador.

1 Introducción

La complicada topografía y la altura a la que se encuentra la ciudad de Quito (2800 msnm), limitan la combustión de los hidrocarburos y obligan a un gran esfuerzo de los automotores para vencer las pronunciadas cuestas. Además, el alto contenido de azufre de los combustibles, desgasta los motores y provoca altas emisiones de azufre y

material particulado, especialmente en sitios puntuales de la ciudad donde la concentración de los contaminantes puede ser molesta e incluso peligrosa.

El material particulado es considerado como uno de los principales problemas de contaminación del DMQ, debido al incremento de días sobre la norma (Figura 1). Los resultados del último año de PM_{10} muestran una superación a la norma anual en todos los sectores monitoreados [4].

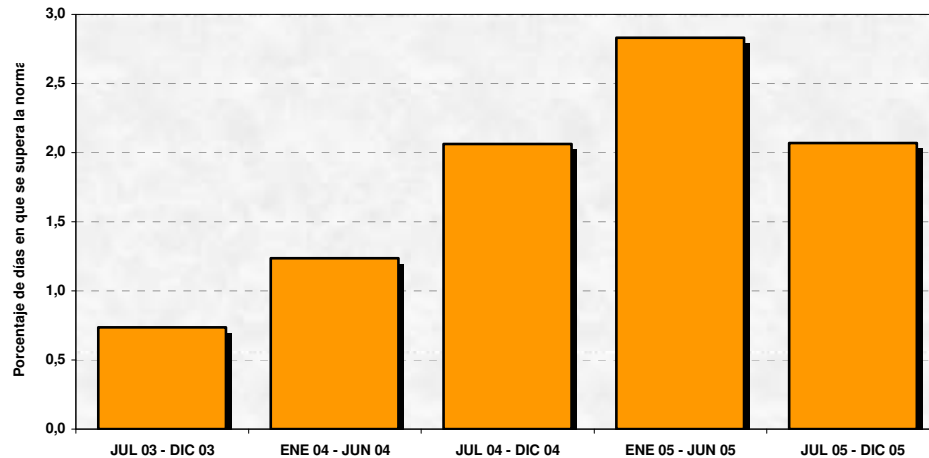


Figura 1: Porcentaje de días sobre la norma de PM_{10} en el Distrito Metropolitano de Quito.

Los límites máximos permitidos establecidos en la legislación ecuatoriana son $15 \mu\text{g.m}^3$ (promedio anual) y $65 \mu\text{g.m}^3$ (promedio 24 horas) para $PM_{2.5}$ y $50 \mu\text{g.m}^3$ (promedio anual) y $150 \mu\text{g.m}^3$ (promedio 24 horas) para PM_{10} . Estos valores son equiparables con los existentes en la mayoría de los países latinoamericanos e incluso con los fijados por la Agencia Estadounidense de Protección Ambiental, USEPA [12].

1.1 El material particulado y sus efectos sobre la salud

El término PM se refiere a partículas discretas (gotas de líquido o sólido) de un amplio rango de tamaños. Las partículas primarias son emitidas directamente al aire del ambiente, mientras las secundarias son formadas en la atmósfera por transformaciones de las emisiones gaseosas como los óxidos de azufre y nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles [11]. Para fines regulatorios, el material particulado se designa comúnmente como $PM_{2.5}$ o PM_{10} lo que refiere a partículas con diámetro aerodinámico menor de $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$, respectivamente.

Para material particulado existen un sinnúmero de estudios epidemiológicos que muestran incremento de mortalidad y morbilidad (admisiones hospitalarias, síntomas respiratorios, disminución de la función pulmonar, etc. [8][14]). Desde este punto de vista, las partículas que mayor interés tienen son las partículas con diámetros menores a $10 \mu\text{m}$ ya que son fácilmente respirables y penetran en los pulmones. Las partículas

de tamaño comprendido en el intervalo 2.5 – 10 μm se depositan en la traquea, bronquios y bronquiolos. Las partículas de tamaño inferior a 2.5 μm , incluyendo las nanopartículas, con medidas del orden de micrómetros, son capaces de llegar al interior de los alvéolos pulmonares, donde las más hidrosolubles se disuelven y las menos hidrosolubles se depositan. En general todas estas partículas pueden acumularse en el sistema respiratorio y producir diversos efectos negativos en la salud que se expresan en el aumento de enfermedades respiratorias como la bronquitis y exacerbar los efectos de otras enfermedades cardiovasculares.

En efecto, estudios sistematizados por la Organización Mundial de la Salud y otras fuentes reportan que al aumentar en 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ PM_{10} se genera un incremento de por lo menos el 8% en el número de consultas por enfermedad respiratoria en los niños entre 5 y 14 años de edad [14].

Por otro lado, el depósito de las partículas sedimentables de origen industrial sobre suelos agrícolas origina modificaciones frecuentemente perjudiciales para los cultivos, y como consecuencia, incide sobre la salud del hombre y los animales.

Adicionalmente, niveles elevados de material particulado afectan la visibilidad y con ello la aeronavegación y también provocan un deterioro más rápido de muchos materiales estructurales o de uso humano.

1.2 Características generales del material particulado

Las partículas atmosféricas se originan de una variedad de fuentes y procesos morfológicos, químicos y físicos. Ejemplos de partículas atmosféricas son las partículas producidas por los procesos de combustión, procesos fotoquímicos, partículas de sal formadas por el spray del océano y partículas de tierra resuspendidas. Algunas son líquidas y otras sólidas. Otras pueden contener un centro sólido rodeado por un líquido. Las partículas atmosféricas contienen iones inorgánicos, componentes metálicos, carbón elemental, compuestos orgánicos y compuestos en forma de cristales. Algunas partículas atmosféricas son higroscópicas. La parte orgánica es especialmente compleja por que contienen miles de compuestos [7].

Dentro de las fuentes antropogénicas o emisiones generadas por el hombre, se encuentran los procesos industriales y de combustión, el transporte vehicular, la presencia de aditivos tanto en combustibles líquidos como gasolina y petróleo, como en los diferentes tipos de aceite que usan los motores de combustión interna [5].

Según el inventario de emisiones del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) para el año 2003 [17], la erosión del suelo, la explotación de las canteras y la quema de combustibles fósiles son las mayores fuentes de material particulado.

La caracterización del material particulado corresponde a una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. A continuación se describirán los criterios principales de una caracterización química de la formación del MP [6]:

Fracción Insoluble: es una fracción emitida por el motor, constituido por partículas llamadas “primarias”. Se encuentra en fase sólida y compuesta

primordialmente por carbono, pero también incluye pequeños tamaños como cenizas no combustibles. Las cenizas son derivadas principalmente de lubricantes, aditivos de combustibles y del desgaste propio del motor.

Sulfatos: los sulfatos son derivados de compuestos de sulfuros del combustible y en una cantidad menor del aceite lubricante. El sulfato es emitido por el motor como anhídrido sulfuroso (SO₂) junto a una menor cantidad de anhídrido sulfúrico (SO₃). Los sulfatos son formados de la reacción entre SO₃ y H₂O, lo que provoca un aumento de masa producto del H₂O. El SO₂ no es un problema debido a que no contribuye directamente al MP. No obstante, el SO₄-2 se combina con el amoníaco para formar cristales de sulfato de amonio.

Fracción Soluble: la fracción soluble es llamada igualmente Fracción Orgánica Soluble (SOF). Involucra compuestos orgánicos de alto peso molecular y muy complejos en su estructura, son derivados del combustible y lubricantes. Las mayores agrupaciones son hidrocarburos no combustionados (alcalinos, aromáticos), hidrocarburos oxigenados (ésteres, ácidos orgánicos, éteres) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH). En el MP se encuentran 16 PAH los cuales son: naftaleno, acenaftaleno, acenafticeno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benz(a)antraceno, criseno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenz(a,h)antraceno, benzo(g,h,i)perileno, indeno(1,2,3-cd)pireno [3].

La composición elemental del material particulado incluye diferentes elementos, unos livianos como el aluminio, silicio, potasio, calcio, y otros pesados como hierro, zinc, vanadio, titanio, cadmio, plomo, mercurio y antimonio además compuestos orgánicos de elevada toxicidad y potencial efecto cancerígeno y mutágeno [3].

El 64.8% del total de los PAH, entre los cuales se encuentran el benz(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenz(a,h)antraceno, indeno(1,2,3-cd)pireno, producen riesgo de cáncer en los seres humanos. El benzo(a)pireno produce mutaciones en las células mamarias provocando tumores. Además, en la pubertad puede influenciar sobre el número de receptores hormonales (esteroide). En adultos y adolescentes influye sobre los niveles y comportamientos de las hormonas sexuales [3].

Las técnicas de microscopía electrónica (SEM) acoplado a microanálisis de rayos X (EDXA), satisfacen idealmente para el análisis de estas muestras. La información analítica conseguida con estas técnicas se puede combinar con otras de proceso y de análisis de imagen para proporcionar la descripción estadística de partículas con respecto a su composición química y morfología. Además, debido a la capacidad de realizar un análisis no destructivo, el análisis por SEM/EDXA, es imprescindible en la caracterización de las muestras PM₁₀ porque permite utilizar la misma muestra en otras técnicas de análisis como las cromatográficas [3].

2 El monitoreo del material particulado en Quito

En el esquema institucional para la gestión de la calidad del aire en el DMQ, le corresponde a la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (CORPAIRE), llevar adelante los proyectos definidos dentro del Plan de Manejo aprobado en agosto del 2005. Uno de esos proyectos tiene que ver con el monitoreo permanente de la calidad del recurso, con énfasis en aquellos parámetros que han sido identificados como los más prioritarios para la ciudad, entre ellos el material particulado.

2.1 Estructura de la red de monitoreo

Corpaire cuenta con ocho muestreadores de alto volumen para material particulado (PM_{10} y PTS) ubicados en la estaciones automáticas de monitoreo. El monitoreo de estos contaminantes se realizan desde junio de 2003, monitoreando cada seis días durante veinticuatro horas, según la norma ecuatoriana [15]

Adicionalmente, a finales de 2004 entraron en funcionamiento seis muestreadores automáticos para material particulado suspendido menor a $2.5 \mu m$, $PM_{2.5}$. La adquisición de estos equipos se la realizó tomando en cuenta los graves efectos en la salud causada por este tipo de partículas. Estos equipos utilizan radiación beta para la cuantificación y reportan resultados cada diez minutos durante 24 horas, los 365 días del año. El equipo BETA determina continuamente la concentración de partículas depositadas en un filtro, por medio de la absorción de un haz de radiación beta. Al no ser un método gravimétrico se evitan algunas interferencias, pues al pesar cantidades tan pequeñas se pueden cometerse errores grandes.

Tomando en cuenta las condiciones geográficas de la ciudad de Quito, es decir su cercanía a volcanes con actividad eruptiva y a la explotación de minas de material pétreo, se inició en el mes de mayo de 2005 la Red de Depósito que cuenta con 33 puntos ubicados dentro y fuera del límite urbano. Esta red cuantifica el polvo sedimentable seco y húmedo según el método Bergerhoff [15], según se establece en la legislación ecuatoriana [9]. Las muestras se toman durante 30 días y se reportan los resultados en función del área expuesta del monitor, en $mg.cm^{-2}.30 d$.

La implantación de los sitios de muestreo tanto de las estaciones automáticas como los de la red de depósito se observan en la Figura 2.

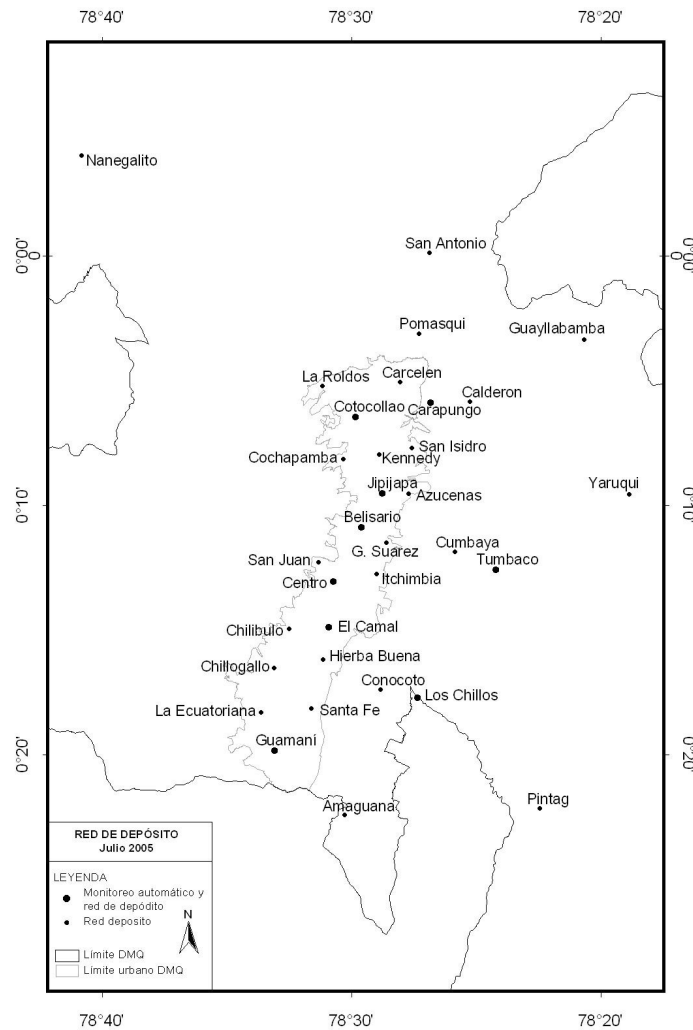


Figura 2: Ubicación de los puntos de monitoreo ambiental de la Red automática y de Depósito del Distrito Metropolitano de Quito.

2.2 La situación de la calidad del aire respecto al material particulado

De los datos obtenidos durante el 2005 [4] para material particulado $PM_{2.5}$, se tiene que en toda el área urbana se sobrepasa el límite anual de $15 \mu g \cdot m^{-3}$ de partículas. Las zonas del norte del DMQ son los sectores con menor porcentaje de excedencia (hasta 50%). Sin embargo en las zonas centro y sur del DMQ, se tienen excedencias de hasta el 200%. Tomando en cuenta que este material particulado fino es básicamente provocado por el proceso de combustión de fuentes móviles y fijas, la distribución espacial resulta coherente con el alto tráfico vehicular de la ciudad (especialmente en sector centro sur de la ciudad) y con la dirección predominante de los vientos en esta época del año que arrastran los contaminantes desde el norte al sur de la ciudad, según los datos obtenidos por las estaciones meteorológicas de la Red. El mapa de la distribución espacial de $PM_{2.5}$ para el 2005 se observa en la Figura 3.

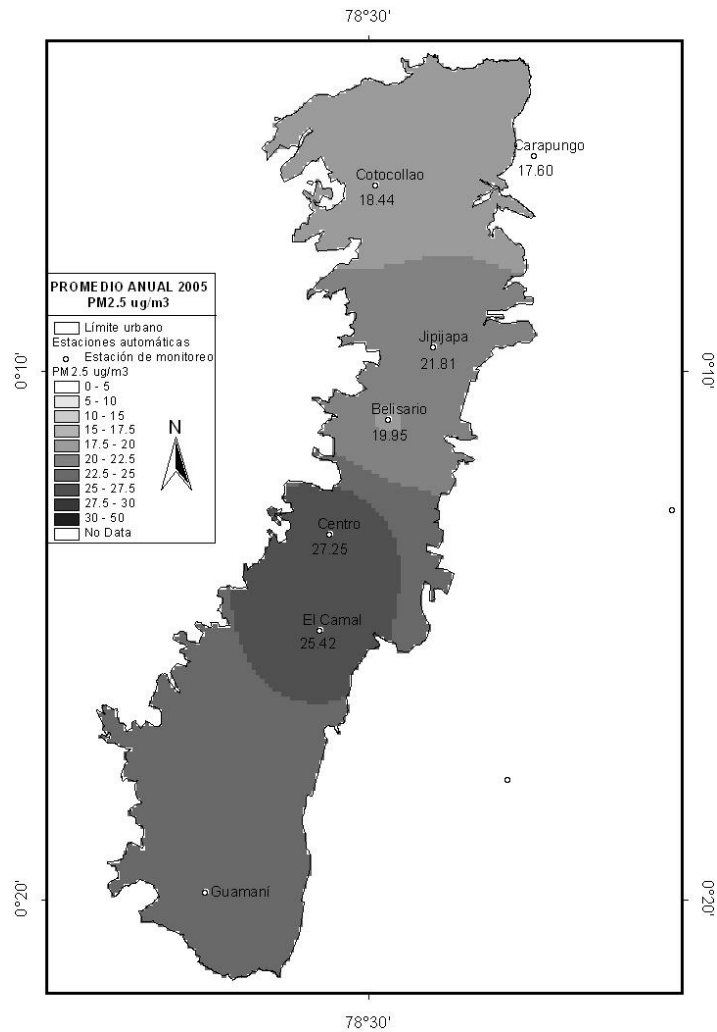


Figura 3: Mapa de distribución del material particulado PM_{2.5} promedio durante el año 2005.

De igual manera, para el PM₁₀ se tiene una excedencia a la norma anual en prácticamente todo el DMQ a excepción del valle de Los Chillos, zona residencial de la ciudad de Quito, fuera del límite urbano.

La distribución del PM₁₀, a diferencia del PM_{2.5}, tiene mayores excedencias (hasta del 75%) conforme se aleja del centro de la ciudad tanto hacia el norte como hacia el sur, a excepción del sitio de muestreo Belisario que presenta valores puntuales más altos. El mapa con la distribución geográfica del contaminante se observa en la Figura 4.

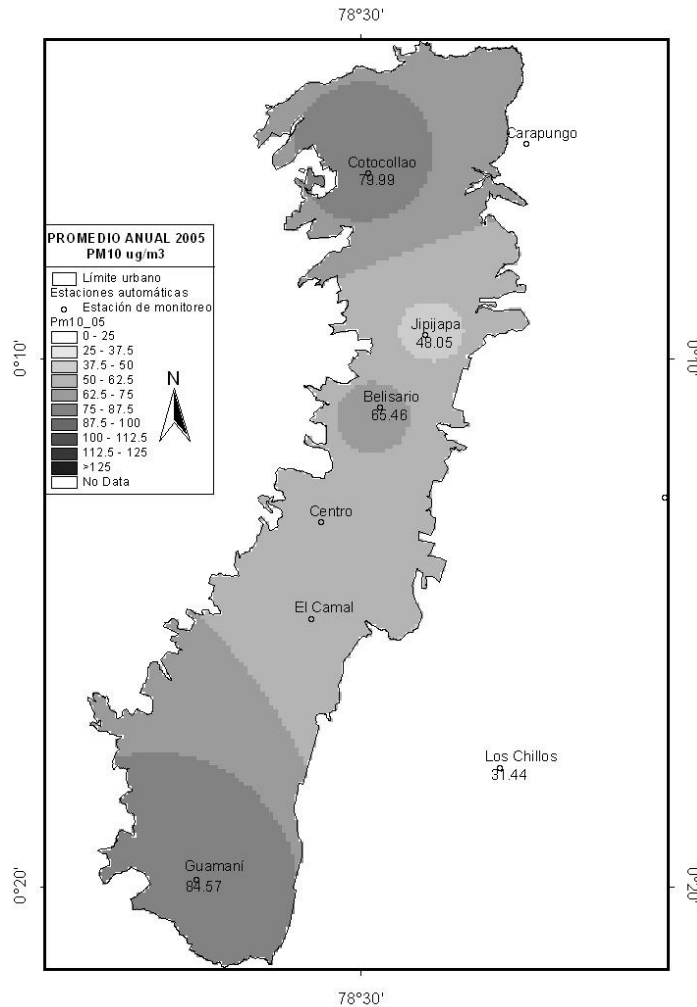


Figura 4: Mapa de distribución del material particulado PM₁₀ promedio durante el año 2005.

Las mayores concentraciones de material particulado PM₁₀ coinciden con las zonas en donde se ha registrado mayor velocidad promedio de vientos durante la época monitoreada. Lo que posiblemente indica que gran parte del material particulado PM₁₀ constituye polvo mineral obtenido por erosión del suelo o desgaste de construcciones.

Luego de los primeros ocho meses de funcionamiento de la Red de Depósito, se observa que existe el 20% de sitios que superan la norma (1 mg.cm-2.30d). La mayoría de estas excedencias se producen en la parte norte del DMQ principalmente fuera del límite urbano (Figura 5).

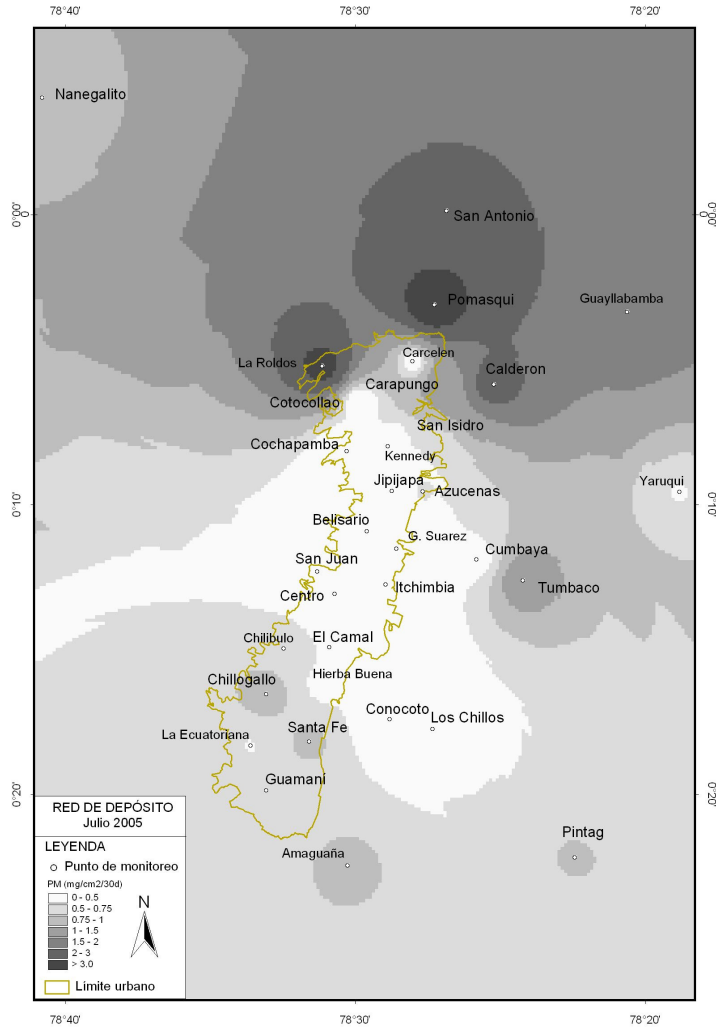


Figura 5: Distribución espacial del polvo sedimentable recogido por la Red de Depósito para el mes de julio 2005.

3 Caracterización del material particulado

Como se mencionó anteriormente, el material particulado constituye uno de los principales problemas de contaminación en DMQ y, tomando en cuenta su compleja y variable composición, se observó la necesidad de realizar un estudio de caracterización con el objeto de identificar las posibles fuentes y su distribución en la ciudad.

3.1 Materiales y métodos

La caracterización del material particulado se realizó en las muestras de PM_{10} tomadas en filtros de microcuarzo. Las muestras analizadas corresponden al período abril - noviembre del 2005. Los filtros, luego del análisis gravimétrico para la cuantificación de PM_{10} , fueron almacenadas a $4^{\circ}C$ protegidas con papel aluminio hasta su caracterización.

Se realizaron análisis de carbón total, polvo mineral, sulfatos, nitratos, amonio y cloruros. Para el análisis de carbón se contó con la colaboración del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. Los análisis de polvo mineral e iones se realizaron en el laboratorio químico de la Corpaire.

El análisis del carbón se realizó mediante el método S.O.P. No. MLD 031[2] en un equipo Shimadzu TOC 5000A. Para la cuantificación de polvo mineral, se utilizó el método gravimétrico para determinación de cenizas luego de calcinar la muestra a $900^{\circ}C$. Los iones fueron analizados con el método SOP MLD007 [1] utilizando cromatografía iónica en un equipo Metrohm IC 861 con una columna Metrosep A Supp 4/5.

Contando con la colaboración del Departamento de Investigación de la Escuela Politécnica del Ejército, se tomaron algunas imágenes de las muestras por medio de microscopía electrónica. Sin embargo, hasta el momento no se ha podido analizar de las imágenes.

3.2 Resultados y discusión

Con la caracterización realizada de este material particulado, se comprobó que el principal componente es polvo mineral (41%). Seguido por 31% de carbón total, 25% de iones y 3% de componentes no identificados (Figura 6).

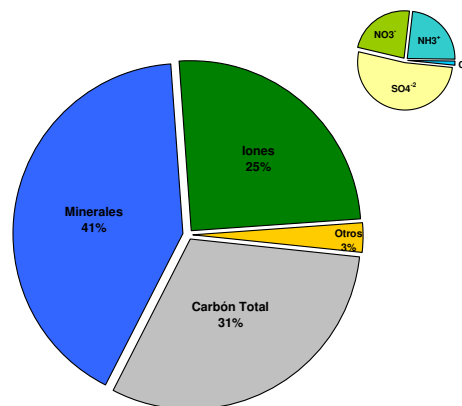


Figura 6. Caracterización del material particulado PM_{10} promedio durante el año 2005.

Dentro de los iones se cuantificaron sulfatos, nitratos, amonio y cloruros. En esta caracterización se observa claramente el efecto del alto contenido de azufre en los combustibles utilizados en el DMQ y la influencia de los gases emitidos por los volcanes activos, el 52% de los iones son sulfatos, esto corresponde al 13% del total del material particulado. Los nitratos, amonio y cloruros corresponden al 6, 5.75 y 0.25% del total del material particulado, respectivamente.

La contribución por categoría varió considerablemente por zona de la ciudad analizada. Para el caso del polvo mineral, las zonas con mayor concentración son las que se encuentran a los extremos norte y sur de la ciudad (52%), en las cuales se tienen mayor porcentaje de terrenos descampados que provocarían este incremento. El carbón total al contrario, se presenta en mayor concentración en las zonas céntricas lo que lo relaciona directamente con el tráfico vehicular y específicamente con procesos de combustión diesel (40%). En cuanto a iones, se presenta una mayor concentración en zonas industriales o de alto tráfico vehicular (sulfatos 15.1%, nitratos 7%, amonio 6.1% y cloruro 0.4%).

Se realizó una comparación con los resultados obtenidos en estudios similares realizado en Monterrey- México[13] entre los años 1995 a 1997 y en Santiago de Chile en invierno de 1999 [16], la Tabla 1 muestra la comparación entre los resultados. Se observa una composición similar entre los tres resultados, encontrándose en Santiago una mayor proporción de iones y menor de carbón total que en los otros dos.

Componente	Quito	Monterrey	Santiago
	%		
Carbón total	31	22	15
Polvo	41	52	49
Iones	25	26	33
Otros	3		3

Tabla 1. Comparación de la caracterización material particulado.

En la Figura 7 se muestran las primeras imágenes (obtenidas mediante un microscopio electrónico) de filtros con partículas PM_{10} , donde se observan cristales de amino silicatos y sulfatos principalmente, según el microanálisis de rayos X (EDXA).

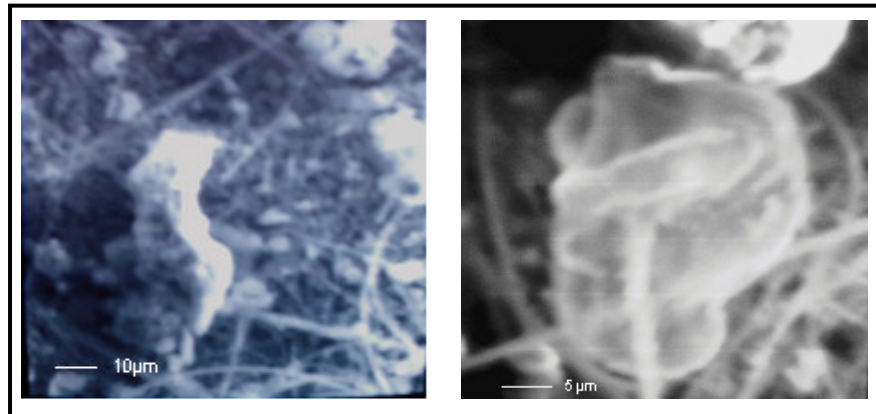


Figura 7. Imágenes de microscopio electrónico del material particulado PM₁₀.

Del análisis estadístico de las concentraciones de sulfatos, cloruros y fluoruros analizados en las muestras de la Red de Depósito durante los meses monitoreados, se observa que existe diferencia estadística representativa ($p < 0.05$) en la estación de Pomasquí (norte de Quito) para el mes de julio. Presentando valores seis veces mayores a los promedio del resto de las estaciones. De igual manera, en el mes de julio se obtuvieron los mayores valores de polvo sedimentable de la época monitoreada, obteniéndose además valores estadísticamente mayores en la zona norte de la Red.

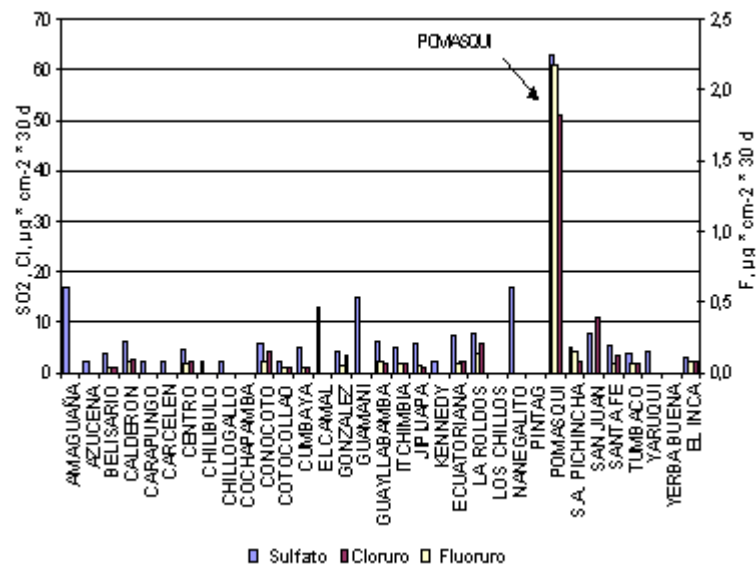


Figura 8. Contenido de sulfatos, cloruros y fluoruros en el polvo sedimentable (Julio, 2005).

Este elevado valor de SO₂ durante el mes de julio resulta inesperado debido a la baja cantidad de lluvias de la temporada y los fuertes vientos, lo cual debería haber disminuido las concentraciones de contaminantes provenientes de fuentes locales.

Por otro lado, de los reportes meteorológicos vinculados con la alerta volcánica por El Reventador (volcán activo ubicado a 100 Km al noreste de Quito), se tiene que el 21 de julio del 2005 existió una pluma de ceniza, proveniente de ese volcán, dirigiéndose a Quito.

La presencia de fluoruros y cloruros, además de los sulfatos, en los sedimentos de la red de depósito, da una clara señal de la fuente volcánica [10] de estas emisiones debido a la inexistencia de fuentes industriales de estos contaminantes en el DMQ.

Debe mencionarse que Pomasquí está fuertemente influenciada por las emisiones fugitivas de polvo provenientes de las canteras de materiales de construcción que operan en la zona, por lo que debe estudiarse la hipótesis de que ese material sirvió de vehículo para la acumulación de gases de azufre que provocaron los altos niveles de sulfatos.

4 Conclusiones y siguientes pasos

Aunque este informe presenta resultados preliminares sobre el monitoreo y la caracterización química del material particulado en el Distrito Metropolitano de Quito, es importante resaltar algunas de las principales conclusiones a las que se ha arribado, tanto en lo referente a los datos, cuanto a los aspectos metodológicos:

- A diferencia de lo que se tenía en el pasado, ahora el DMQ cuenta con una Red de Monitoreo de Material Particulado bien establecida para evaluar los diferentes tamaños de material particulado, lo cual contribuirá a dimensionar de mejor manera los impactos relacionados.
- Los resultados obtenidos hasta el momento nos permiten conocer el grave efecto que causan a la salud del sector las canteras que aún se explotan en el sector norte del DMQ. De igual manera se comprueba la gran cantidad de material particulado provocado por los sulfatos de los combustibles que se utilizan en la ciudad. Esto especialmente en sectores con alto tráfico vehicular de vehículos a diesel.
- El estudio también nos permitió conocer el contenido de fluoruros y cloruros provenientes de las emisiones volcánicas que afectan al sector y la necesidad de monitorear con mayor frecuencia los niveles de fluoruros, los cuales fuera de norma, causan algunas enfermedades.

Es necesario continuar el estudio, abarcando mayor tiempo de muestreo y realizando una caracterización física del material, al igual que la determinación de hidrocarburos, los cuales no han sido analizados hasta el momento. Esta inclusión se deberá realizar debido al alto grado de toxicidad de los mismos y a la certeza de existencia de los mismos en nuestros combustibles, luego de la eliminación del plomo de las gasolinas.

Actualmente se está trabajando en la cuantificación de aniones en el material de depósito húmedo y seco. Lo que ya nos ha permitido identificar la influencia de los gases provenientes de las emisiones volcánicas cercanas.

5 Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la colaboración interinstitucional que permite la realización este tipo de investigaciones pese a las limitaciones económicas de nuestras organizaciones.

Los autores agradecen al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional en donde fueron realizados los análisis de carbón total para la caracterización del material particulado, así como al Instituto de Investigación de la Escuela Politécnica del Ejército por las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico.

Referencias

- [1] Air Resources Board. 2002. *S.O.P. No. MLD 007: Determination of Sulfate, Nitrate, and Chloride Using Ion Chromatography*. California Environmental Protection Agency. California-EUA.
- [2] Air Resources Board. 2002. *S.O.P. No. MLD 031: Determination of PM10 Total Carbon in the Ambient Air*. California Environmental Protection Agency. California-EUA.
- [3] Chong, NS., Sivaramakrishnan, K., Wells, M., Jones, K. 2002. *Characterization of Inhalable Particulate Matter in Ambient Air by Scanning Electron Microscopy and Energy-Dispersive X-ray Analysis*. EJEAFCh. 1 (3): 1579-4377.
- [4] CORPAIRE. 2006a. *La Calidad del Aire de Quito. Informe anual 2005*. Quito-Ecuador.
- [5] CORPAIRE. 2006b. *Emisiones Anuales PM10 en: Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2003*. Quito-Ecuador. .7.
- [6] Eastwood, P. 2000. *Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment*. Research Studies Press Ltd.
- [7] Gillies, JA., Watson, JG., Rogers, CF., DuBois, D., Chow, JC., Langston, R., Sweet, J. 1999. *Long-term efficiencies of dust suppressants to reduce PM₁₀ emissions from unpaved roads*. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 49(1):3-16.
- [8] Harrison, R.. 2003. *Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health?*. *The Science of the Total Environment*. 249: 85-101.
- [9] Ministerio del Ambiente. 2003. *Libro VI Anexo 4, en TULAS*.
- [10] OPS. 2005. *Contaminación atmosférica por emisiones volcánicas en: Guía de preparativos de*

- salud frente a erupciones volcánicas*. Organización Panamericana de la Salud. Quito-Ecuador. 55 p.
- [11] Pilinis, C., Seinfeld, JH. 1987. *Continued development of a general equilibrium model for inorganic multicomponent atmospheric aerosols*. *Atmos. Environ.* 21: 2453-2466.
- [12] Seigneur, C., Pai, P., Hopke, KP., Grosjean, D. 1999. *Characterization of Inhalable Particulate Matter in Ambient Air by Scanning Electron Microscopy and Energy-Dispersive X-ray Analysis*. *D. Environ. Sci. Technol/News*: 80A-86A.
- [13] Semarnap, Gobierno del Estado de Nuevo León, 1997. Programa de Administración de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey 1997-2000. México.
- [14] Solarte, I., Caicedo, M., Restrepo, S. 1999. *Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Santa fede Bogotá*. Universidad Javeriana.
- [15] SWISSCONTACT. 2001. *Fundamentos: Precipitación de Polvo en: Manual de Laboratorio*. Programa Aire Puro: Programa Regional para Centro América y el Caribe.
- [16] Universidad de Santiago de Chile. 2003. Composición de material particulado PM₁₀ en: Modelo de Simulación de los Efectos en Salud Producidos por la Contaminación Atmosférica en la Región Metropolitana. Santiago de Chile.
- [17] WHO. 2003. *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide*. World Health Organization.